

Espelhos e Fontes de Corrente

✓ Espelho de Corrente (não idealidades)

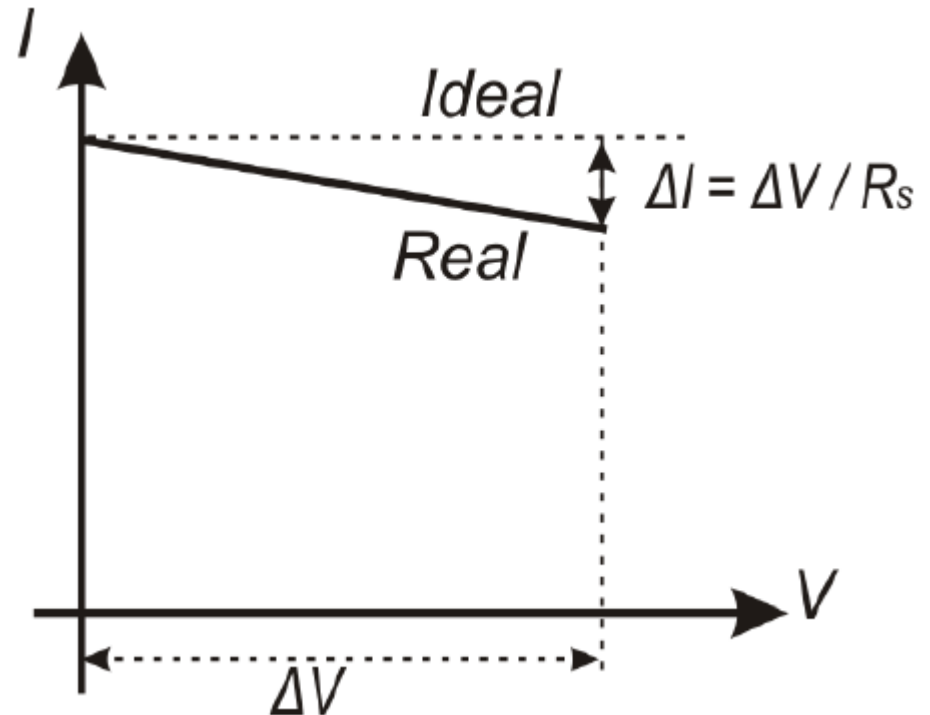
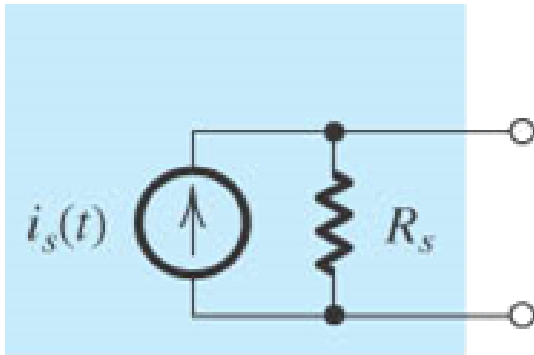
Espelho de Corrente de *Wilson*

Espelho de Corrente de *Widlar*

Fontes de Corrente como carga ativa

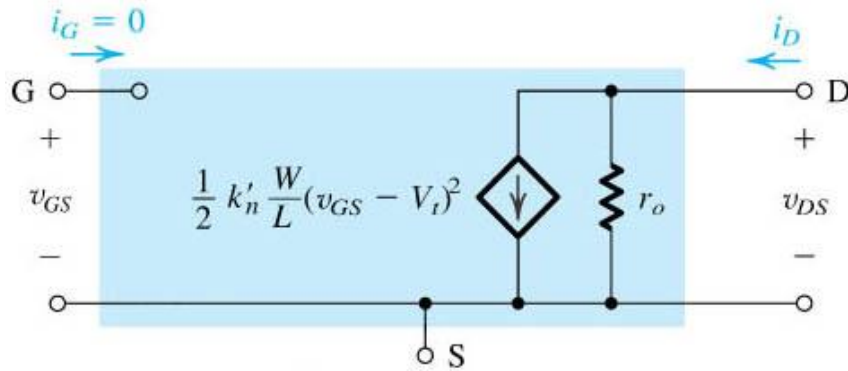
Espelhos e Fontes de Corrente

Fonte de Corrente ideal



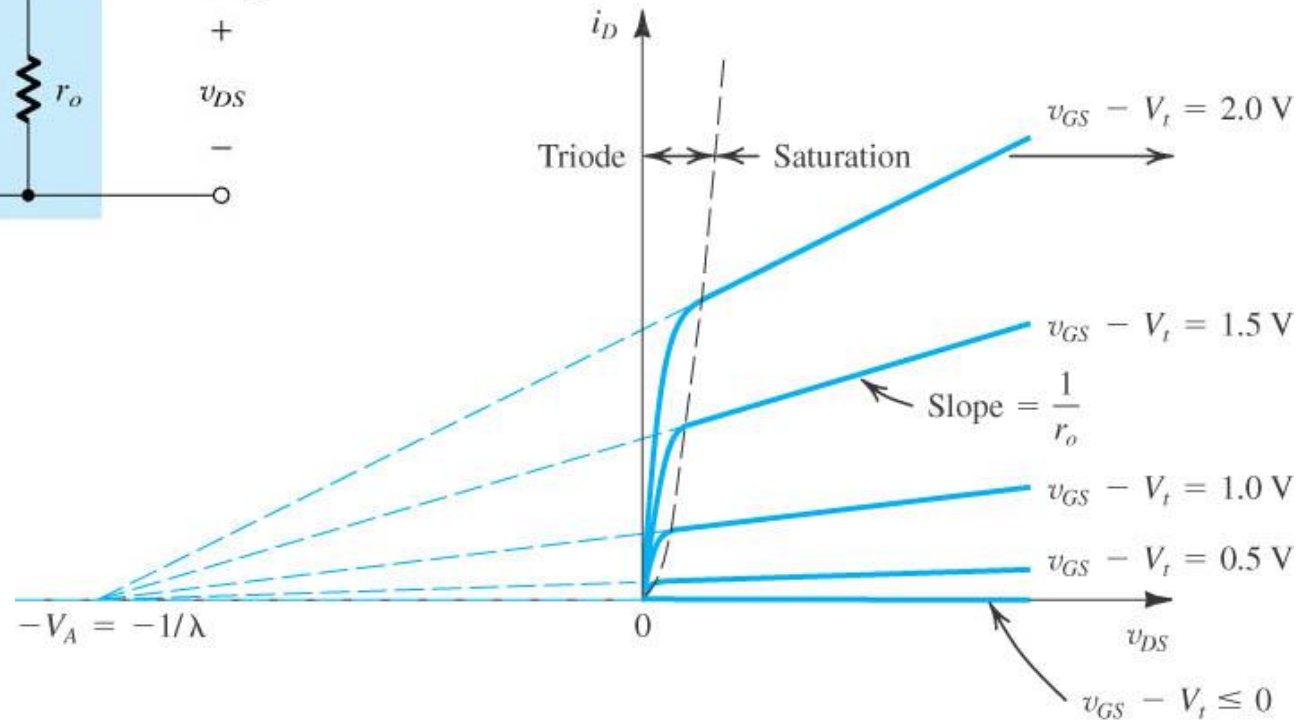
Espelhos e Fontes de Corrente

Impedância de Saída



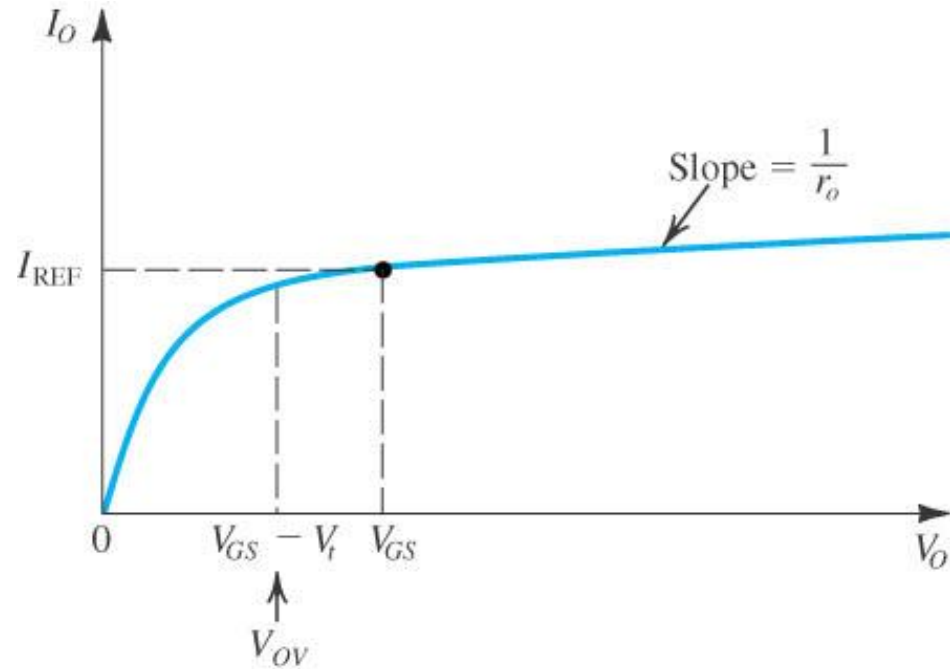
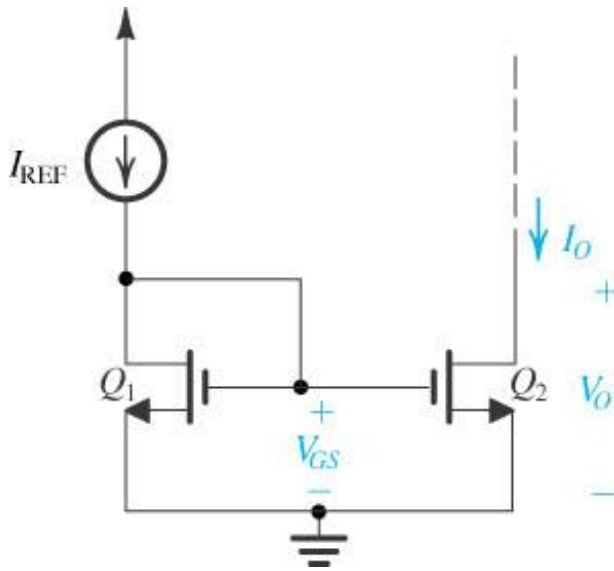
$$r_o = \left. \frac{\partial v_{DS}}{\partial i_D} \right|_{v_{GS} = \text{const.}}$$

$$r_o = \frac{V_A' L}{I_D} = \frac{V_A}{I_D}$$



Espelhos e Fontes de Corrente

Não idealidades do espelho de Corrente (MOS)



Resistência de saída finita

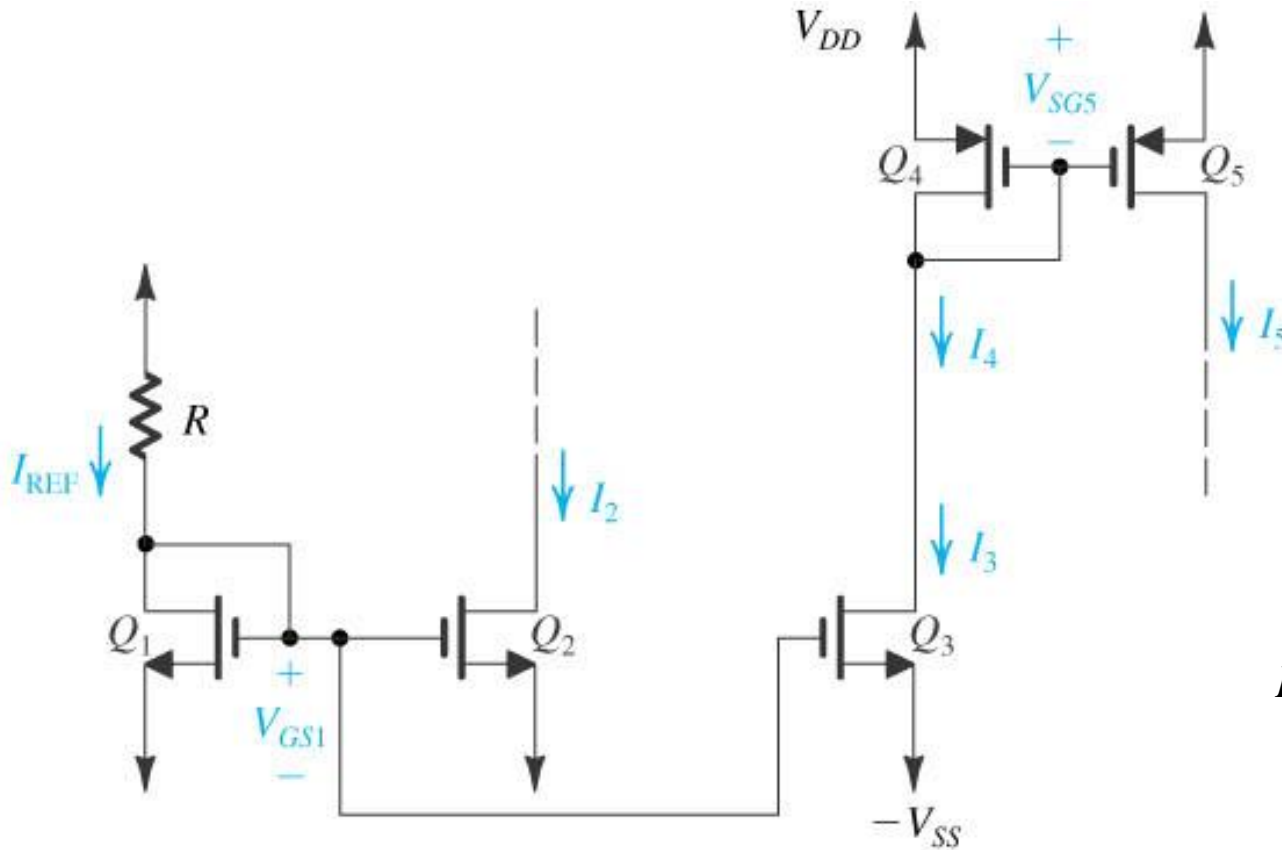
$$R_o = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_o} = r_{o2} = \frac{V_{A2}}{I_o}$$

$$\frac{I_o}{I_{REF}} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} \left(1 + \frac{V_o - V_{GS}}{V_{A2}} \right)$$

Razão de espelho considerando o efeito *Early*

Espelhos e Fontes de Corrente

Guias de corrente na tecnologia CMOS



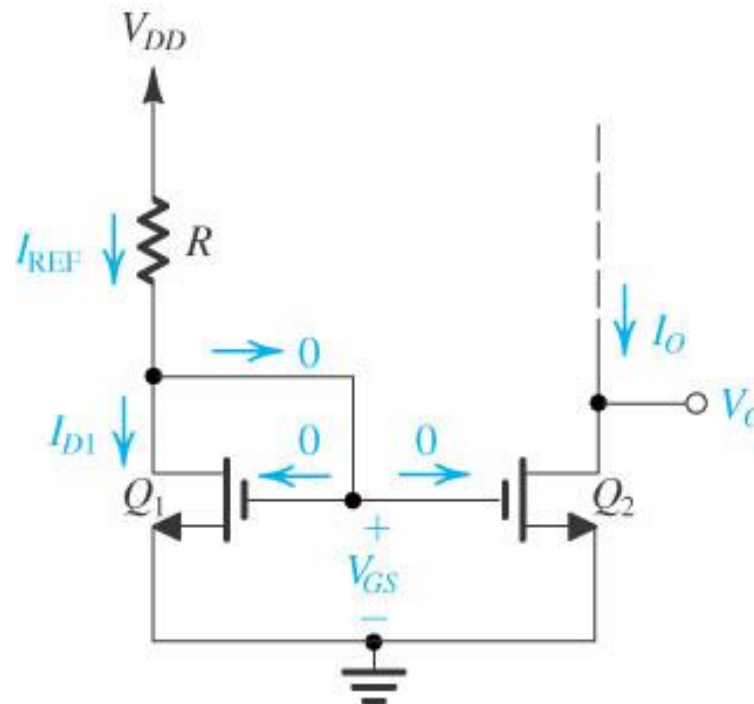
$$I_5 = \frac{(W/L)_5}{(W/L)_4} I_4$$

$$I_2 = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} I_{REF}$$

$$I_3 = \frac{(W/L)_3}{(W/L)_1} I_{REF}$$

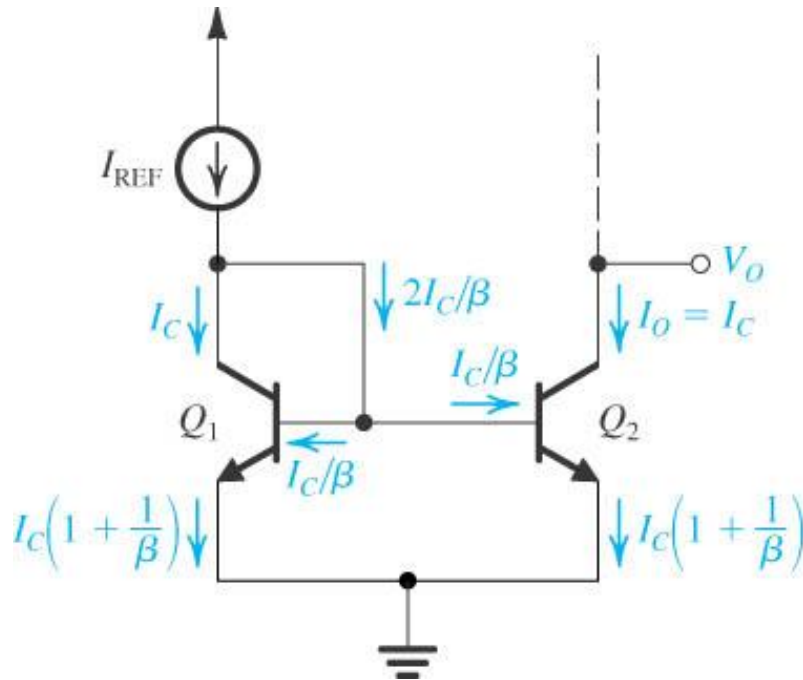
Espelhos e Fontes de Corrente

1 – Projetar o espelho de corrente abaixo para se obter uma corrente de polarização de $100\ \mu\text{A}$. Encontre R considerando $V_{DD} = 3\ \text{V}$, $I_{REF} = 100\ \mu\text{A}$, transistores casados e com $L = 1\ \mu\text{m}$, $W = 10\ \mu\text{m}$, $V_t = 0.7\ \text{V}$ e $k'_n = 200\ \mu\text{A}/\text{V}^2$. Qual o menor valor possível de V_o ? Assuma $V_A' = 20\ \text{V}/\mu\text{m}$. Encontre a impedância de saída da fonte de corrente. Qual o novo valor da impedância se $L = 10\ \mu\text{m}$?



Espelhos e Fontes de Corrente

Não idealidades do espelho de Corrente (BJT)
Corrente da Base



Efeito do β finito.

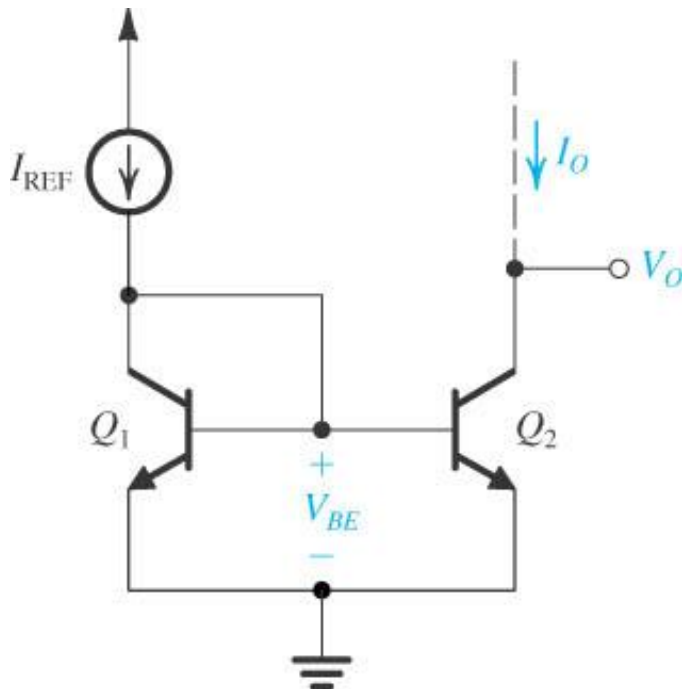
$$I_{REF} = I_C + 2I_C/\beta = I_C \left(1 + \frac{2}{\beta} \right)$$

$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{I_C}{I_C \left(1 + \frac{2}{\beta} \right)} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{m}{1 + \frac{m+1}{\beta}}$$

Espelhos e Fontes de Corrente

Não idealidades do espelho de Corrente (BJT)
Impedância de Saída



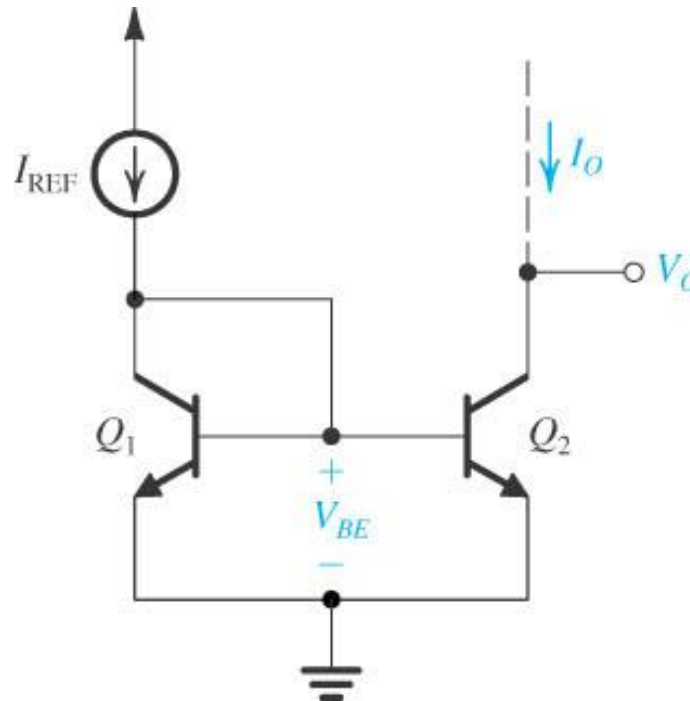
$$R_o = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_o} = r_{o2} = \frac{V_{A2}}{I_o}$$

$$I_o = I_{REF} \frac{m}{1 + \frac{m+1}{\beta}} \left(1 + \frac{V_o - V_{BE}}{V_{A2}} \right)$$

Resistência de saída finita

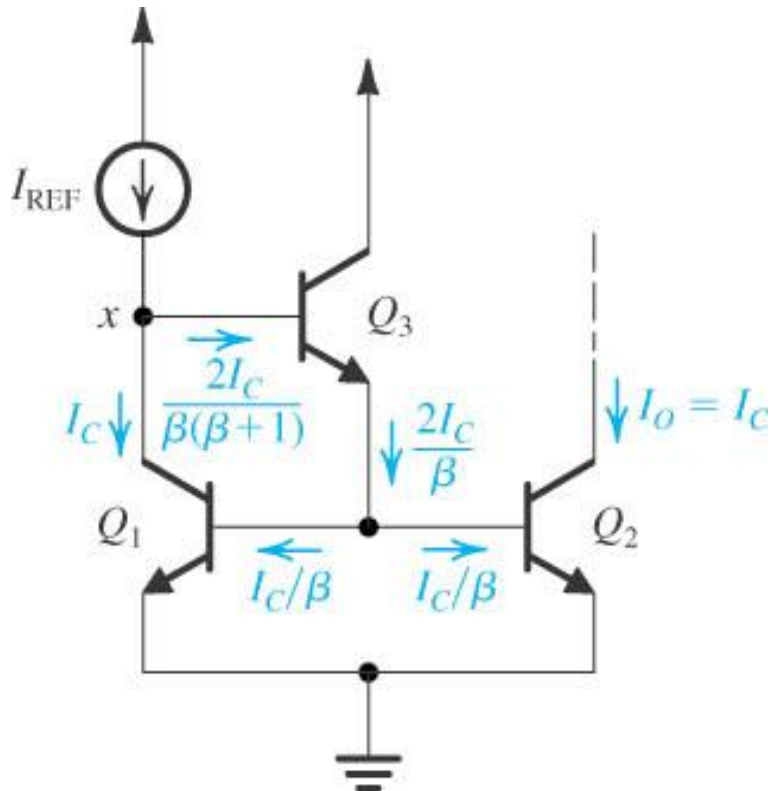
Espelhos e Fontes de Corrente

2 - Considere um espelho de corrente com $m = 1$. Se $I_s = 10^{-15} \text{ A}$, $\beta = 100$, $V_A = 100 \text{ V}$ e quando $V_o = 5 \text{ V}$, $I_o = 1 \text{ mA}$. Qual o valor de I_{REF} e qual a impedância de saída?



Espelhos e Fontes de Corrente

Espelho de Corrente Bipolar com compensação de corrente da base

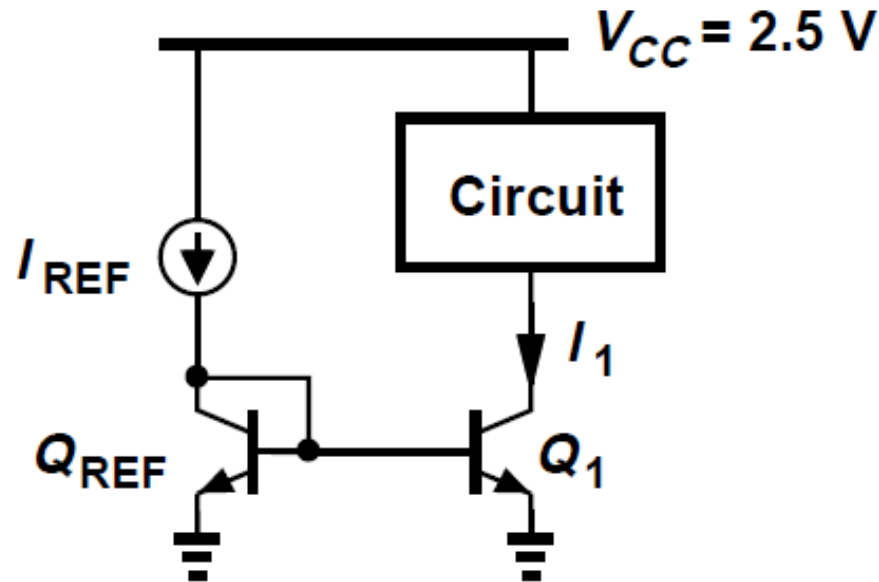


$$I_{REF} = I_C \left[1 + \frac{2}{\beta(\beta+1)} \right]$$

$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{1}{1 + 2/(\beta^2 + \beta)} \cong \frac{1}{1 + 2/\beta^2}$$

Espelhos e Fontes de Corrente

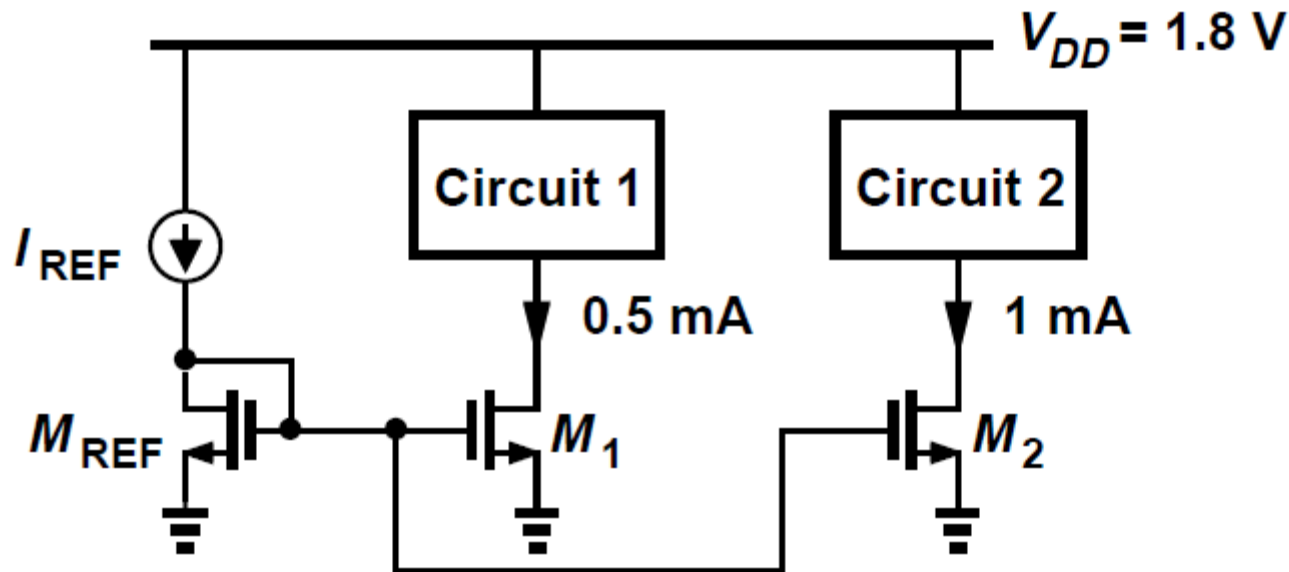
3 - O espelho de corrente da figura abaixo deve fornecer $I_1 = 0,5 \text{ mA}$ para um circuito com potência máxima dissipada de 2 mW . Use $\beta \gg 1$ e $V_A = \infty$. Determine o valor de I_{REF} e os tamanhos relativos de Q_{REF} e Q_1 .



Espelho de Corrente TBJ

Espelhos e Fontes de Corrente

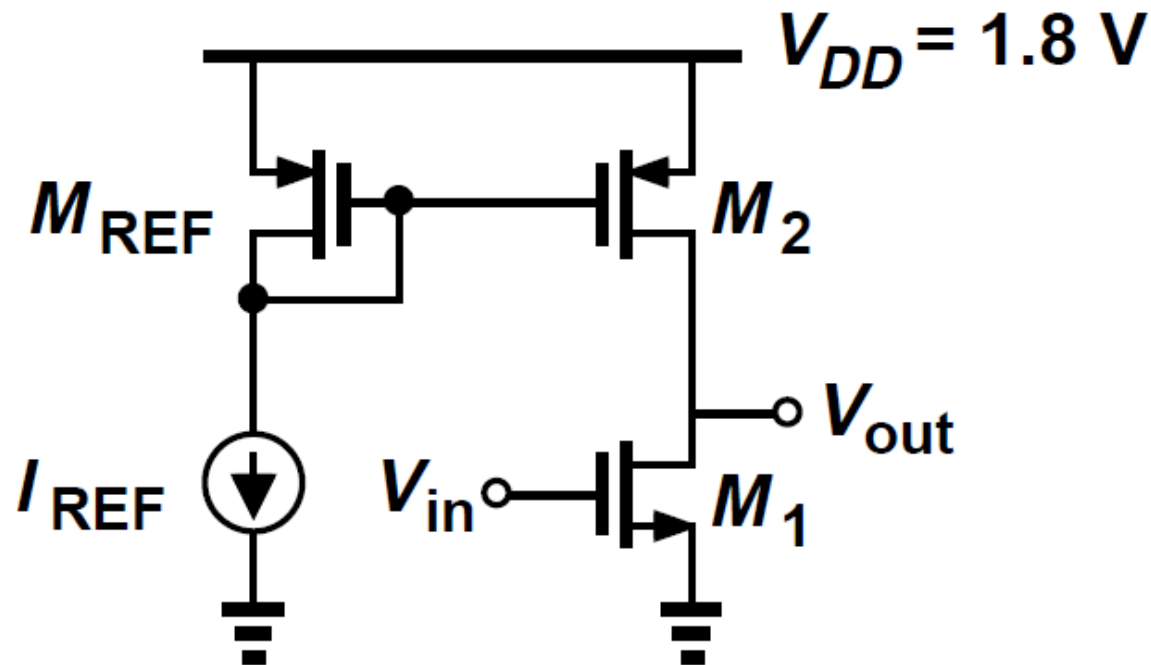
4 - Os transistores M_1 e M_2 da figura abaixo são utilizados como fonte de correntes para os circuitos 1 e 2 respectivamente. Projete o circuito abaixo para uma potência máxima dissipada de 3 mW.



Espelho de Corrente MOS

Espelhos e Fontes de Corrente

5 - Projete o amplificador fonte comum da figura abaixo para um ganho de tensão de 20 V/V e máxima potência dissipada de 2 mW. Use $(W/L)_1 = 20/0.18$, $\lambda_n = 0,1 \text{ V}^{-1}$ e $\lambda_p = 0,2 \text{ V}^{-1}$, $k'_n = 100 \mu\text{A/V}^2$ e $V_t = 0,4 \text{ V}$.



Amplificador fonte Comum com espelho de Corrente MOS

Espelhos e Fontes de Corrente

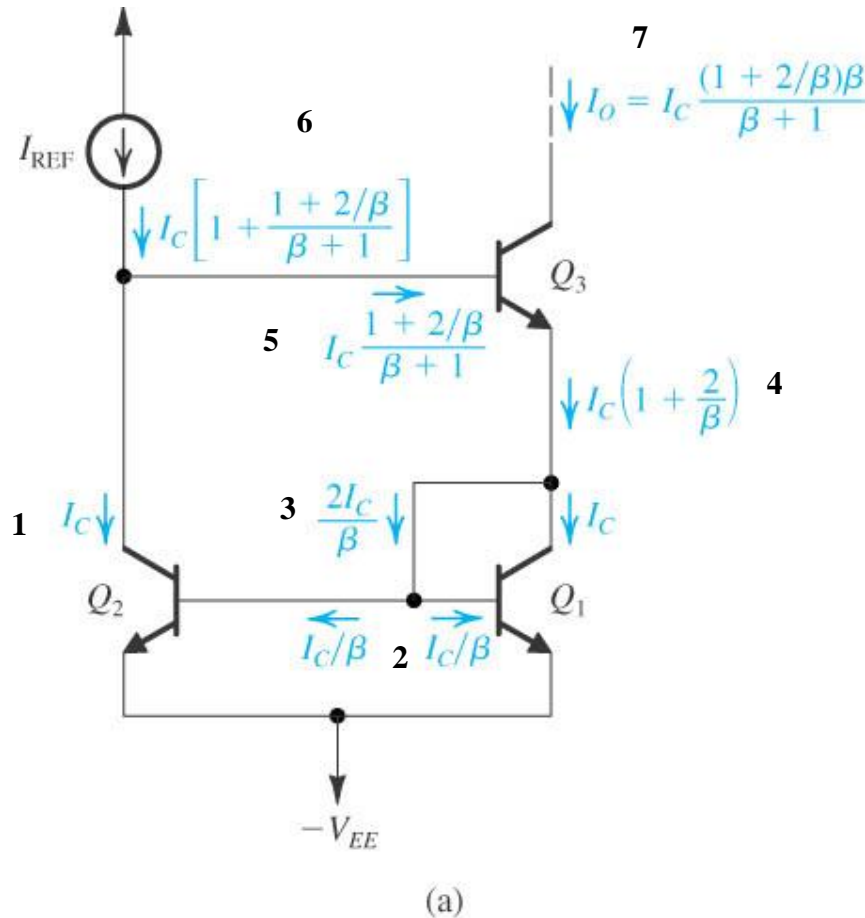
Espelho de Corrente (não idealidades)

- ✓ Espelho de Corrente de *Wilson*
- ✓ Espelho de Corrente de *Widlar*
- ✓ Fontes de Corrente como carga ativa

Espelhos e Fontes de Corrente

Espelho de Corrente Wilson (BJT)

Diminuir a dependência de β e aumentar a imped. de saída.



$$\frac{I_o}{I_{REF}} = \frac{\beta + 2}{\beta + 2 + \frac{2}{\beta}}$$

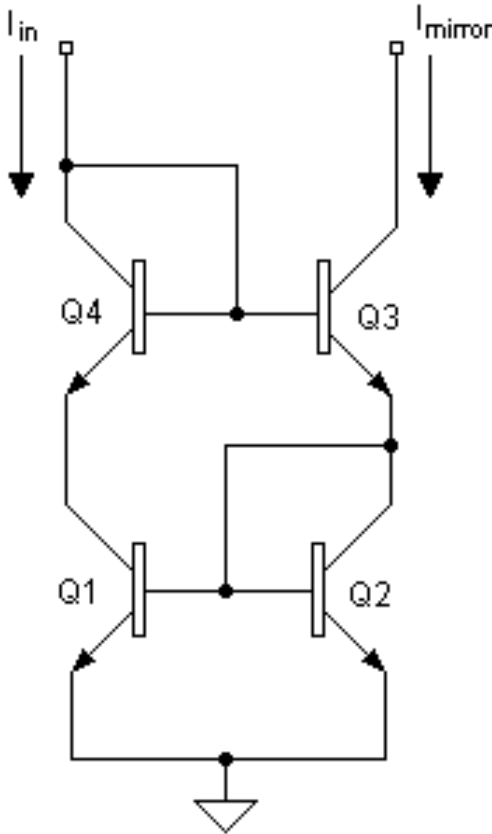
$$\frac{I_o}{I_{REF}} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta(\beta + 2)}} \cong \frac{1}{1 + 2/\beta^2}$$

Impedância de Saída

$$R_o \cong \beta r_o / 2$$

Espelhos e Fontes de Corrente

Espelho de Corrente Wilson (BJT)

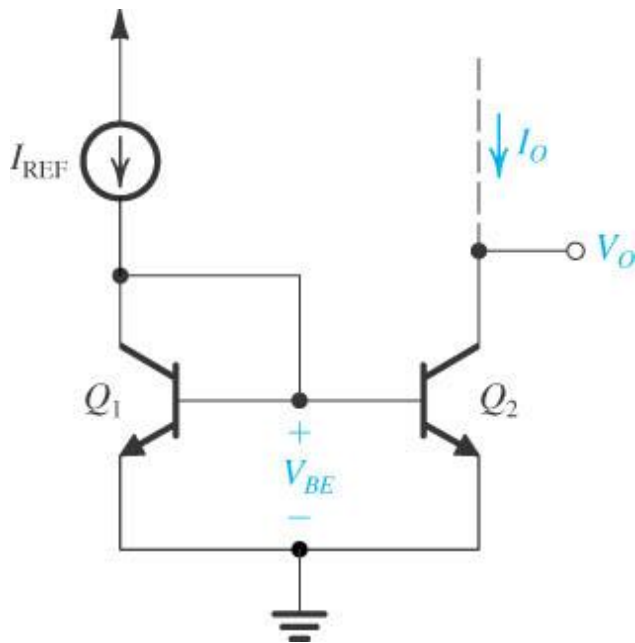


Acrescentando mais um transistor:

- » Equaliza as tensões do coletor de Q_1 e Q_2 ($1V_{BE}$)
- » Melhora a linearidade.
- » Potência dissipada na junção de Q_1 e Q_2 é a mesma, cancelando os efeitos térmicos em V_{BE} .

Espelhos e Fontes de Corrente

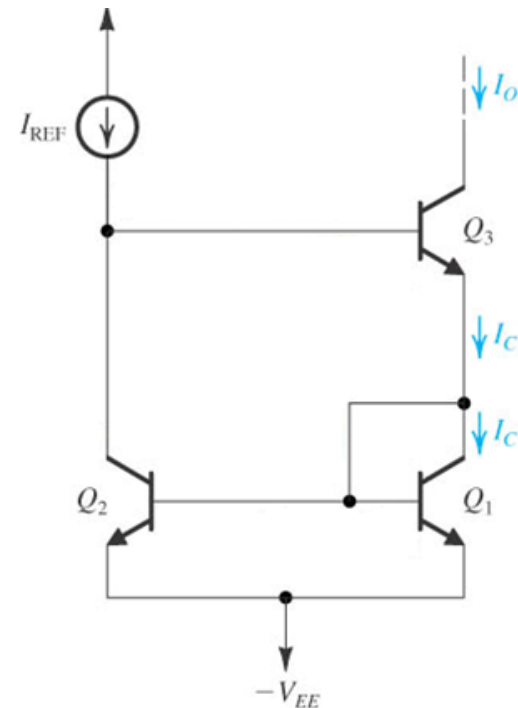
6 - Considerando $\beta = 100$ e $r_o = 100 \text{ k}\Omega$, compare o espelho de corrente Wilson com o espelho de corrente simples em relação ao erro devido ao β finito e a impedância de saída.



Simple

Erro = 2%

$R_o = 100 \text{ k}\Omega$



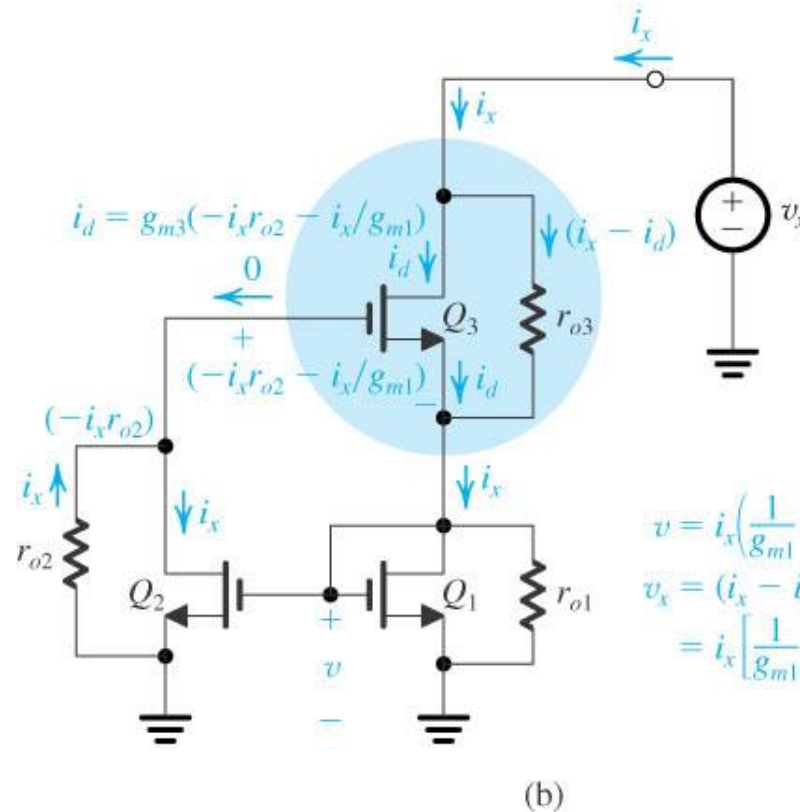
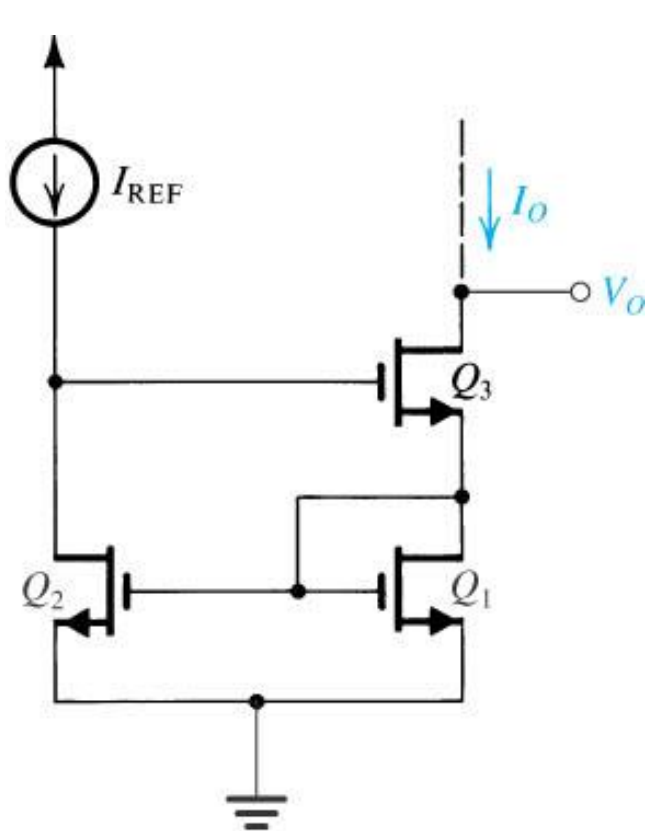
Wilson

Erro = 0.02%

$R_o = 5 \text{ M}\Omega$

Espelhos e Fontes de Corrente

Espelho de Corrente Wilson (MOS)

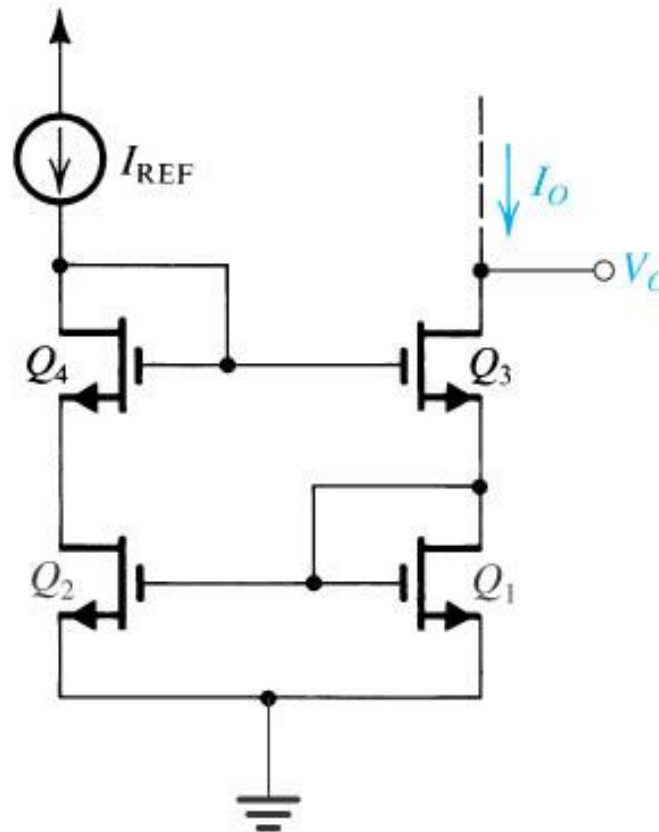


Impedância de Saída

$$R_o = r_{o3}(g_{m3}r_{o2} + 2) \cong g_{m3}r_{o3}r_{o2}$$

Espelhos e Fontes de Corrente

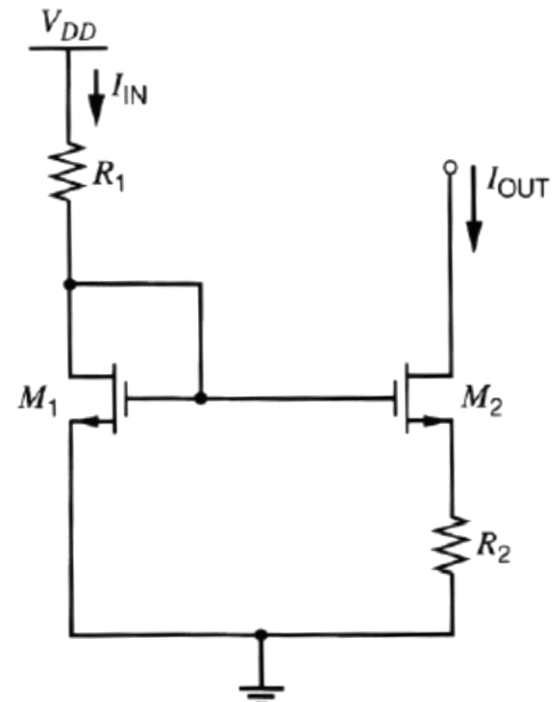
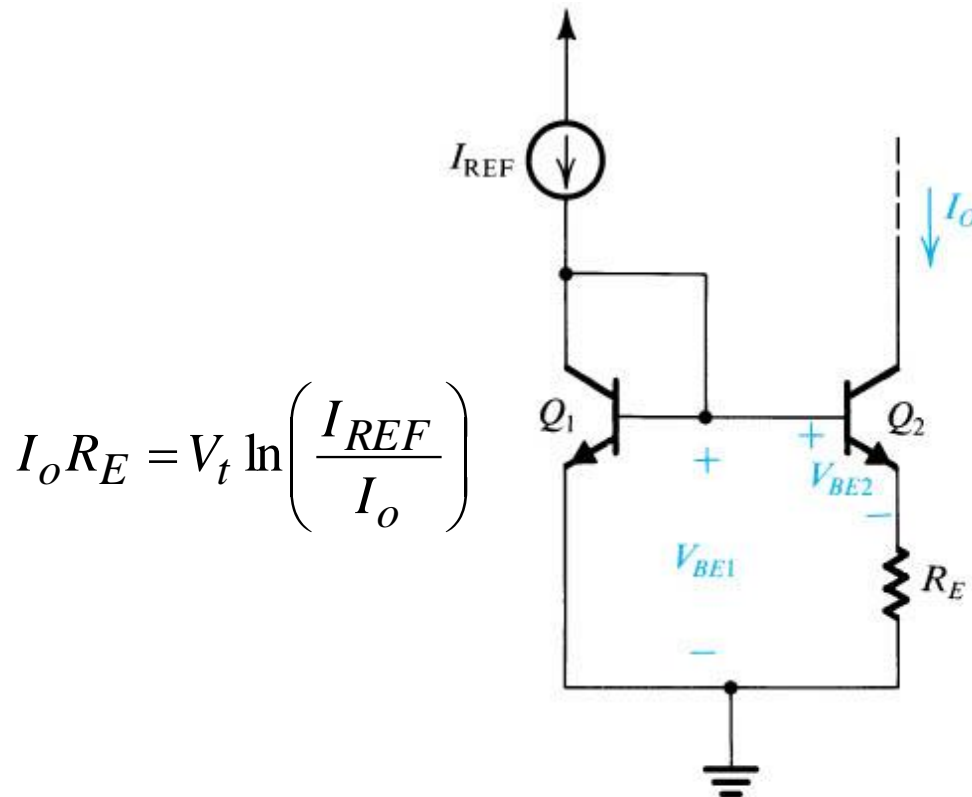
Espelho de Corrente Wilson (MOS)



Circuito melhorado para evitar erro na corrente I_o causado por valores diferentes de V_{DS} entre Q_1 e Q_2

Espelhos e Fontes de Corrente

Espelho de Corrente Widlar
Degeneração de emissor ou fonte

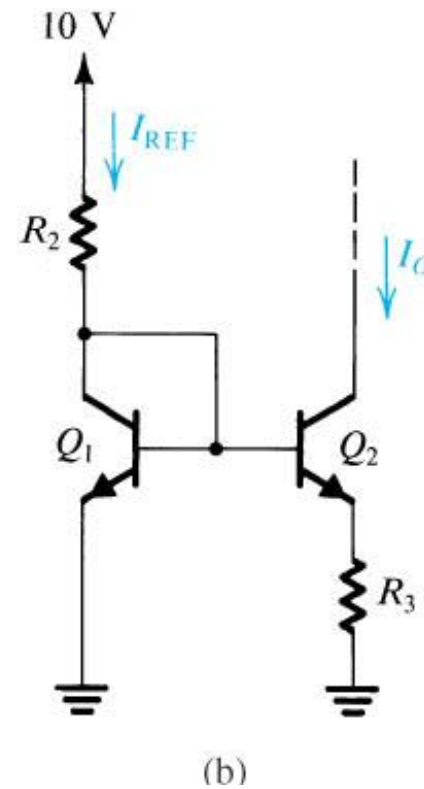
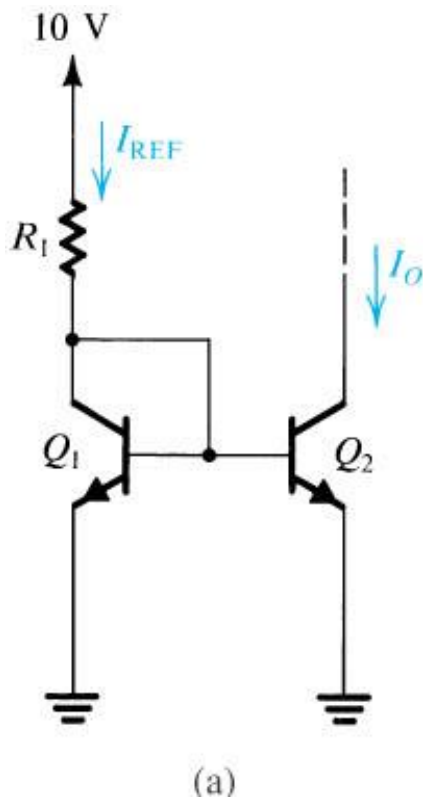


Impedância de Saída

$$R_o \cong [1 + g_m (R_E \parallel r_\pi)] r_o$$

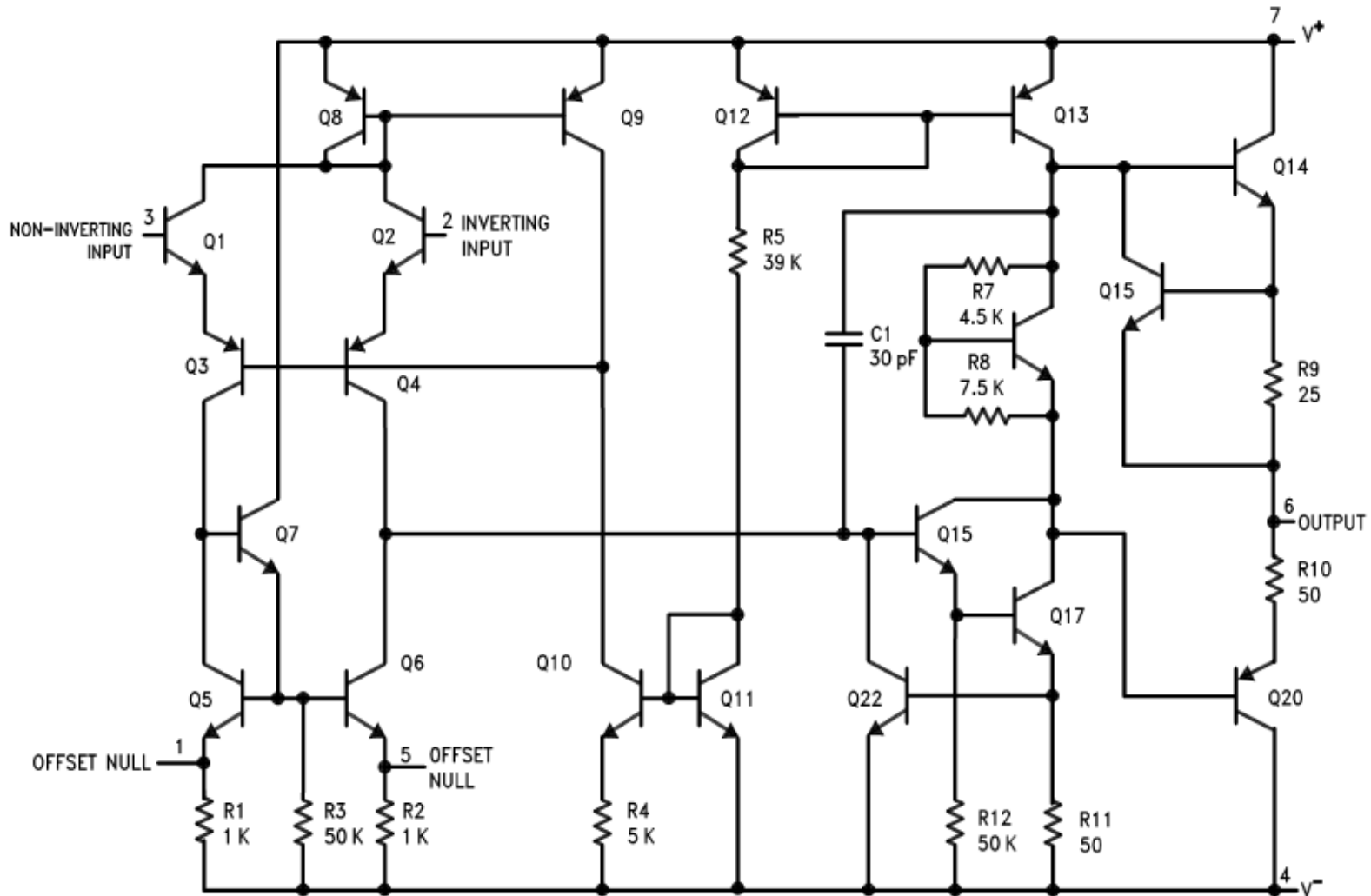
Espelhos e Fontes de Corrente

7 - Determine os valores dos resistores para os espelhos de corrente abaixo para $I_O = 10 \mu\text{A}$. Use $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ em 1 mA e desconsidere o efeito de β .



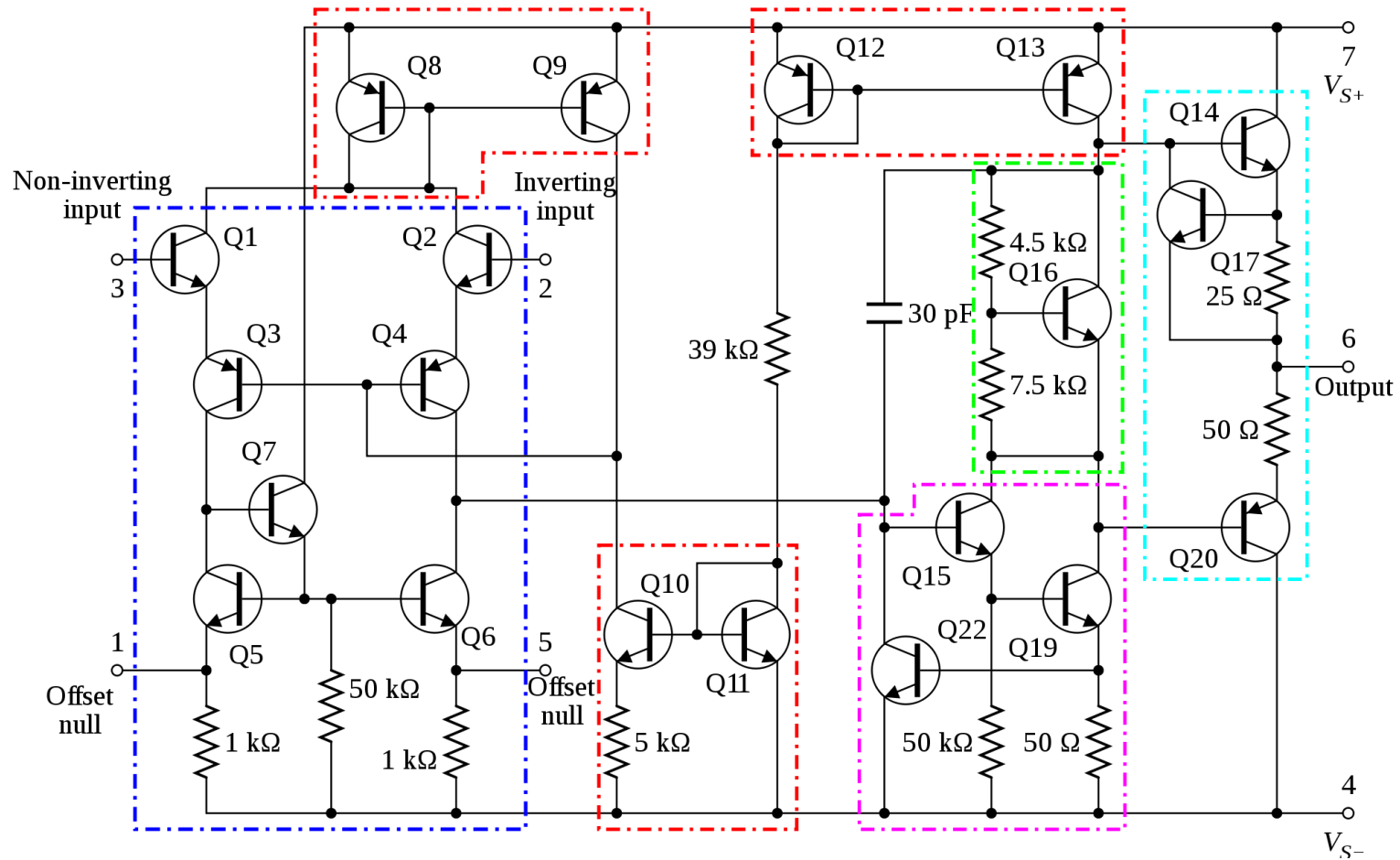
Espelhos e Fontes de Corrente

Amp. operacional 741



Espelhos e Fontes de Corrente

Amp. operacional 741



Partes em **vermelho**: espelhos de corrente

Espelhos e Fontes de Corrente

Sugestão de Estudo:

- Sedra & Smith 5ed.
 - Cap. 6, item 6.3
 - Cap. 6, item 6.12

- Razavi. 2ed.
 - Cap. 9, item 9.2

Exercícios correspondentes.